Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 319-336

Assessment of Riverine Currents to Estimate the Theoretical Hydrokinetic Power and Energy Using Hydraulic Geometry

M. Sadeghi-Delooee[1], R. Alimardani[2*], H. Mousazadeh[3]

1- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: rmardani@ut.ac.ir)

Received: 15 May 2023 Revised: 11 August 2023 Accepted: 22 August 2023 Available Online: 01 September 2024	**How to cite this article:** Sadeghi-Delooee, M., Alimardani, R., & Mousazadeh, H. (2024). Assessment of Riverine Currents to Estimate the Theoretical Hydrokinetic Power and Energy Using Hydraulic Geometry. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 319-336. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.82429.1166

Introduction

There are two types of hydropower harvesting methods: conventional and unconventional. In the conventional method, the potential energy of water is harvested using a dam or barrage. However, in the unconventional method, the kinetic energy of flowing water is extracted using hydrokinetic turbines. Resource assessment is a pivotal step in developing hydrokinetic energy sites. Power density (power per unit area) is used to estimate the theoretical hydrokinetic power of a site. Flow velocity and cross-sectional area are the two variables that constitute the power density. Researchers use various methods such as numerical simulation, direct velocity measurement, or indirect velocity calculation using discharge data to conduct resource assessment. In the latter method, the Manning equation is used to convert the discharge data into velocity values. While this method is straightforward for canals, given their fixed and known geometry, it is cumbersome to calculate the hydraulic radius in rivers. To overcome this challenge, numerous researchers have proposed the utilization of hydraulic geometry (HG) to estimate the width and depth of a river reach, and then calculate the hydraulic radius based on these estimated values. The main objective of this study is to present and implement a fast method for assessing theoretical hydrokinetic power using the HG and the Manning equation.

Materials and Methods

In the present study, two hydrometry stations (Gachsar and Siera-Karaj) were selected in the Karaj dam watershed in Iran to implement resource assessment based on HG. A computer code comprising the following four steps was developed in Python using the Google COLAB environment.

1. Data Preparation: The monthly-averaged discharge, Manning roughness coefficient, and slope were collected and imported into the code. The roughness coefficient could be determined directly or indirectly. In the present study, it was considered to be 0.045 for the Karaj River according to the literature review. ArcGIS software and the Digital Elevation Model (DEM) were used to extract the local slope of each hydrometry station. For this purpose, the stream network of Alborz province was first extracted, and then the longitudinal elevation profile was measured using the 3D Analyst tools.

2. Discharge Data Processing: The flow duration curve (FDC) is one of the computational tools used by engineers to describe the hydrological regime of watersheds. FDC is a graphical representation of the cumulative

https://doi.org/10.22067/jam.2023.82429.1166

distribution of flows. In the present study, an all-time record FDC for each station was constructed, and fitted with five different probability distribution functions (PDF). The results of PDF fittings were evaluated by different goodness-of-fit indices, and the best PDF was selected.

3. Calculations of HG and the Manning Equation: The HG formulas were used to calculate the width and depth of flow using the reconstructed FDC from the previous step. These values, along with the roughness coefficient and slope, were used to calculate flow velocity using the Manning equation. After obtaining the flow velocity values, the power density was easily computed.

4. Generating Outputs: In the final step, two categories of outputs are generated: (1) duration curves for width, depth, flow velocity, and power density, and (2) theoretical and turbine-extracted energy diagrams.

Results and Discussion

The goodness-of-fit indices for PDF fitting indicated that the log-normal PDF is the most suitable distribution to describe the FDC with a coefficient of determination of 0.99. The calculated average discharge (Q_{50}) for the Gachsar and Siera stations was 2.34 and 7.68 m^3s^{-1}, respectively. These values are consistent with findings from previous studies. The results of the Manning equation calculations revealed that the flow velocity does not differ significantly between these stations (8% higher at Siera). The base flow depth at the Gachsar and Siera stations is less than 1 m. Therefore, as indicated in the literature review, axial flow (propeller) turbines are not suitable for installation in these rivers because they need to be fully submerged and require at least 1 m of depth. Overall, the use of wide and short turbines, such as Savonius turbines, is suggested in the Karaj River. The energy analysis results show that the maximum monthly theoretical energy at Gachsar and Siera equals 38,500 and 125,500 kWh, respectively. However, considering a turbine with a 1 m^2 swept area and a power coefficient of 0.2, the maximum monthly extracted energy is limited to 940 and 1,142 kWh at these two stations.

Conclusion

This study presents a fast method for the theoretical assessment of hydrokinetic power, which was applied to two hydrometry stations in the Karaj dam watershed. The results of HG calculations revealed that the base velocity (V_{90}) of 1.34 and 1.49 m s^{-1} is present at the Gachsar and Siera stations, respectively. According to the available depths at these stations, the use of wide and short turbines such as Savonius turbines is suggested. Each individual Savonius turbine with a unit swept area at Gachsar and Siera is estimated to extract a maximum monthly energy of 940 and 1,142 kWh, respectively.

Keywords: Flow duration curve, Hydraulic radius, Manning equation, Monthly energy, Probability distribution

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ١٤، شماره ٣، پاییز ١٤٠٣، ص ٣٣٦-٣١٩

ارزیابی جریان رودخانه‌ها به‌منظور تخمین توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری با بهره‌گیری از هندسه هیدرولیک

مهران صادقی دلوئی[1]، رضا علیمردانی[2*]، حسین موسی زاده[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

چکیده

توربین‌های آبی‌جنبشی با قرارگیری درون رودخانه و بدون نیاز به ساخت سد یا بند آبگیر قادر به استحصال انرژی جنبشی آب و تولید برق هستند. یکی از موضوعاتی که در به‌کارگیری این فناوری بسیار حائز اهمیت است موضوع پتانسیل‌سنجی و تخمین توان و انرژی نظری به‌منظور انتخاب مناطق مستعد نصب چنین تجهیزاتی است. از بین روش‌های متنوع پتانسیل‌سنجی، در این پژوهش استفاده از هندسه هیدرولیک و محاسبه سرعت جریان از معادله مانینگ انتخاب شد. به‌منظور پیاده‌سازی این روش یک کد کامپیوتری توسعه یافت که طی ۴ مرحله سرعت، چگالی توان و انرژی نظری سایت‌های موردنظر را محاسبه و در اختیار کاربر قرار می‌دهد. برای پیاده‌سازی این روش دو ایستگاه هیدرومتری گچسر و سیرا در حوضه آبخیز سد کرج در استان البرز انتخاب شدند. ابتدا منحنی تداوم جریان هر ایستگاه با توابع توزیع احتمال برازش شد و سپس با استفاده از هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ، سرعت، چگالی توان و انرژی جریان محاسبه شد. منحنی تداوم جریان هر دو ایستگاه مورد ارزیابی با توزیع لوگ نرمال و ضریب تعیین ۰/۹۹ برازش شدند. چگالی توان نظری برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا با احتمال ۹۰٪ و بیشتر به‌ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۶۷ کیلووات بر مترمربع برآورد شد. با توجه به عمق کم جریان، استفاده از توربین‌های ساونیوس برای این دو سایت پیشنهاد می‌شود. بیشینه انرژی ماهانه تولیدی توسط یک دستگاه توربین با مساحت جاروب واحد در گچسر و سیرا نیز به‌ترتیب برابر ۹۴۰ و ۱۱۴۲ کیلووات ساعت برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی ماهانه، توزیع احتمال، شعاع هیدرولیک، معادله مانینگ، منحنی تداوم جریان

مقدمه

انرژی برق‌آبی[4] با حرکت آب در چرخه هیدرولوژیک (چرخه آب)[5] تأمین می‌شود. چرخه آب توان خود را از انرژی خورشیدی تأمین می‌کند، به‌گونه‌ای که تابش خورشیدی که به سطح زمین رسیده، به گرما تبدیل شده و آب را تبخیر می‌کند. نزدیک به ۵۰٪ از کل انرژی خورشیدی ورودی به زمین برای تبخیر استفاده می‌شود و تبدیل به انرژی نهان[6] در بخار آب می‌شود. مقداری از بخار آب (۲۲٪) به خشکی‌ها وارد می‌شود که بعداً به‌صورت ابر متراکم شده و به شکل نزولات جوی می‌بارد. مقداری از نزولات جوی که بر روی سطح زمین می‌ریزد رواناب تولید می‌کند و تحت تأثیر گرانش به سمت دریاها و دریاچه‌ها باز می‌گردد. از آن‌جایی‌که توان چرخه آب از انرژی خورشیدی تأمین می‌شود، تا زمانی‌که خورشید می‌تابد این چرخه نیز

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: rmardani@ut.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2023.82429.1166

4- Hydropower
5- Hydrological Cycle (Water Cycle)
6- Latent Energy

ادامه خواهد داشت و انرژی آبی را به یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پایدار تبدیل می‌کند (Killingtveit, 2022). بهره‌برداری از انرژی برق‌آبی را می‌توان به دو صورت مرسوم و غیرمرسوم انجام داد. به‌صورت مرسوم از انرژی پتانسیل آب استفاده می‌شود، اما در روش غیرمرسوم انرژی جنبشی آب با استفاده از مبدل‌های آبی‌جنبشی به برق تبدیل می‌شود که آن را انرژی آبی‌جنبشی[1] می‌نامند. امروزه روش غیرمرسوم تولید انرژی برق‌آبی بیشتر مورد توجه است زیرا اثرات ناچیزی بر روی جریان طبیعی آب دارد. مبدل‌های آبی‌جنبشی می‌توانند بدون ساخت یک سد، بند آبگیر و مسیر انحرافی روی جریان طبیعی به تولید انرژی بپردازند (Saini & Saini, 2023). اصل کار مبدل‌های انرژی آبی‌جنبشی شبیه به یک توربین بادی است، فقط محیط کاری از هوا به آب تغییر می‌کند (Killingtveit, 2019). شکل ۱ اجزا و فرآیند تبدیل انرژی در این نوع مبدل‌ها را نشان می‌دهد (Yadav, Kumar, & Jaiswal, 2023). این مبدل‌ها طی ۴ مرحله انرژی الکتریکی را تولید و ذخیره می‌کنند: (۱) توربین انرژی جنبشی موجود در آب جاری را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند (انرژی مکانیکی محور دوار توربین)، (۲) مجموعه‌ای از چرخ‌دنده‌ها برای بهینه‌سازی سرعت و گشتاور محور دوار استفاده می‌شود که مولد انرژی الکتریکی را به حرکت درمی‌آورد (مولد انرژی الکتریکی باید با سرعت ثابتی کار کند زیرا هر دستگاه برای کار در بسامد ثابت ساخته می‌شود)، (۳) ژنراتور الکتریکی انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، (۴) در مرحله آخر یا انرژی الکتریکی تولیدی مستقیماً به شبکه متصل می‌شود یا از یک باتری برای ذخیره‌سازی آن استفاده می‌شود.

حوزه‌های تحقیقاتی مهمی که امروزه همچنان به‌منظور بهبود فناوری آبی‌جنبشی ضروری است شامل مطالعات ارزیابی و پتانسیل‌سنجی، انتخاب و بهبود توربین، ارزیابی بازده تبدیل انرژی و اثرات زیست‌محیطی می‌شود (Ibrahim, Mohamed, & Ismail, 2021). جنکینسون (Jenkinson, 2010) اولین دستورالعمل جامع برای سنجش پتانسیل انرژی آبی‌جنبشی را تدوین کرد. خلیق و کوسینو (Khaliq & Cousineau, 2020) در گزارش جامع خود با عنوان «ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی کانادا» بیان کردند که توان جنبشی یک سیال در حال حرکت را می‌توان با استفاده از چگالی سیال، سرعت سیال و مساحت سطح مقطعی که انرژی از آن استحصال می‌شود محاسبه نمود (رابطه ۱)، که در آن P_K توان جنبشی در دسترس، ρ چگالی سیال، A مساحت سطح مقطع و V سرعت سیال است؛ آن‌ها همچنین افزودند که توان آبی‌جنبشی به‌صورت چگالی توان (PD)[2] نیز ارائه می‌شود (رابطه ۲) که درواقع همان توان به ازای سطح واحد است. در جریان‌های رودخانه‌ای می‌توان این فرض را داشت که حتی با تغییرات دما، تغییری در چگالی رخ نمی‌دهد و چگالی ثابت می‌ماند. بر این اساس مساحت و سرعت سیال تنها متغیرهایی هستند که برای تعیین توان آبی جنبشی مورد نیاز است. لذا تعیین سرعت، مخصوصاً توزیع سرعت میانگین[3]، درون یک رودخانه فاکتور اساسی در ارزیابی توان آبی‌جنبشی نظری[4] یک رودخانه است. از طرفی میزان انرژی نظری[5] ($E_{Theoretical}$) موجود در یک مقطع رودخانه در یک بازه زمانی (T) را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه نمود که این بازه زمانی برحسب ساعت بوده و برای ماه‌های مختلف برابر تعداد روز هر ماه ضرب‌در عدد ۲۴ است (Ibrahim *et al.*, 2021). بر این اساس انرژی تولیدی هر دستگاه توربین ($E_{Turbine}$) از رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن A_s مساحت جاروب[6] و C_p ضریب توان[7] توربین است (Niebuhr, van Dijk, Neary, & Bhagwan, 2019). ضریب توان نیز طبق رابطه (۵) برابر نسبت توان استحصالی توربین ($P_{Turbine}$) به کل توان جریان هم‌مساحت با توربین (P_{Flow}) است (Khani, Shahsavani, Mehraein, & Kisi, 2023).

$$P_K = \frac{1}{2}\rho A V^3 \quad (۱)$$

$$PD = \frac{P_K}{A} = \frac{1}{2}\rho V^3 \quad (۲)$$

$$E_{Theoretical} = P_K.T = \frac{1}{2}\rho A V^3 T \quad (۳)$$

$$E_{Turbine} = P_K.C_p.T = \frac{1}{2}\rho A_s V^3 C_p T \quad (۴)$$

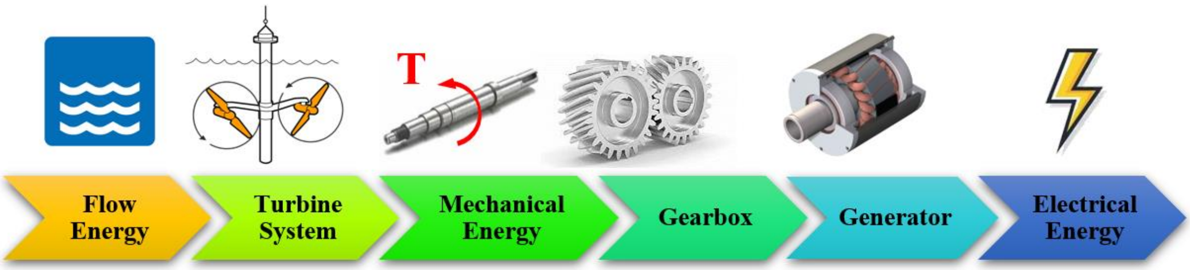
$$C_p = \frac{P_{Turbine}}{P_{Flow}} \quad (۵)$$

مطالعات متعددی به روش‌های مختلف برای ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی رودخانه‌های سراسر جهان در سطوح محلی و منطقه‌ای انجام شده است (Kirby, Ferguson, Rennie, Nistor, & Cousineau, 2022). در تعدادی از پژوهش‌ها، شبیه‌سازی عددی جریان رودخانه به‌منظور محاسبه سرعت جریان و تعیین دقیق محل نصب توربین‌های آبی‌جنبشی استفاده شده است. در پژوهشی توسط لاتاگارسیا و همکاران (Lata-García, Jurado, Fernández-Ramírez, & Sánchez-Sainz, 2018) که با هدف توسعه یک

1- Hydrokinetic Energy

2- Power Density (PD)
3- Time-Averaged Velocity Distribution
4- Theoretical Hydrokinetic Power
5- Theoretical Energy
6- Swept Area
7- Coefficient of Power

سامانه هیبریدی فوتوولتائیک–آبی‌جنبشی انجام شد، از نرم‌افزار HEC-RAS برای ارزیابی پتانسیل و همچنین تعیین مکان بهینه توربین در رودخانه گوایاس در جنوب اکوادور استفاده شد و نتایج نشان‌دهنده‌ی تطابق بالا بین بیشینه سرعت حاصل از شبیه‌سازی (۲/۳۴ متر بر ثانیه) و اندازه‌گیری‌های تجربی (۲/۲۶ متر بر ثانیه) بودند. در مطالعاتی روی حوضه آبخیز رودخانه آمازون برای پتانسیل‌سنجی و مکان‌یابی نقاط بهینه نصب توربین از شبیه‌سازی هیدرودینامیکی (تخمین سرعت و عمق آب) در نرم‌افزار ANSYS-CFX (dos Santos, Camacho, Tiago Filho, Botan, & Vinent, 2019) و کد SisBaHia® (Henrique da Costa Oliveira *et al.*, 2021) استفاده شد.



شکل ۱– اجزای توربین‌های آبی‌جنبشی و فرآیند تولید برق (با کمی تغییرات (Yadav *et al.*, 2023))
Fig.1. Components of hydrokinetic turbines and the process of electricity generation

ارزیابی پتانسیل انرژی آبی‌جنبشی در رودخانه توکانتینس برزیل با به‌کارگیری یک مدل دوبعدی هیدرودینامیک و معادله سنت‌ونان انجام شد و مقایسه نتایج آن با داده‌های ای‌دی‌سی‌پی[1] نشان داد شبیه‌سازی خطای میانگین ۸/۷۷٪ و بیشینه ۲۲٪ را به همراه داشته است (Da Silva Holanda *et al.*, 2017). در دو مطالعه توسط علی و همکاران (Ali *et al.*, 2020) و آدگون و همکاران (Adeogun, Ganiyu, Ladokun, & Ibitoye, 2020) از SWAT در GIS برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک رودخانه و ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی نظری استفاده شد و نتایج آن تطابق خوبی با داده‌های مشاهداتی داشتند که نشان‌دهنده‌ی قدرت این نرم‌افزار در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز است.

در بعضی از مطالعات مستقیماً از داده‌های تجربی سرعت استفاده شده است. سائینی و همکاران (Saini, Kumar, & Saini, 2021) با استفاده از داده‌های سرعت به بررسی انرژی آبی‌جنبشی یک کانال آبیاری در هند پرداختند و میزان تولید انرژی توسط آرایش مختلف توربین‌ها محاسبه شد. نابتسه و همکاران (Nhabetse, Cuamba, Kucel, & Mungoi, 2017) به‌منظور ارزیابی تولید برق با استفاده از توربین‌های آبی‌جنبشی و امکان‌سنجی نصب آن‌ها با تحلیل فراوانی داده‌های تاریخی سرعت رودخانه به تولید منحنی‌های تداوم سرعت[2] پرداختند. ساوپی و همکاران (Saupi, Mailah, Radzi, Ahmad, & Soh, 2018) با بیان این‌که داده‌های سالانه سرعت آب دارای اهمیت بالایی در ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی است به کمبود و ناکافی بودن این داده‌ها در پایگاه‌های داده محلی اشاره کردند و روشی نوین ارائه دادند که با استفاده از داده‌های دبی و بارش باران بتوان سرعت آب را تخمین زد. آن‌ها با مدل‌سازی رگرسیونی دو معادله با ضریب تعیین ۸۷/۴٪ و ۸۷/۹٪ به‌ترتیب برای تخمین ارتفاع سطح و سرعت آب توسعه دادند.

با توجه به عدم وجود داده‌های سرعت جریان در بسیاری از رودخانه‌ها و کانال‌های آبرسانی، عموماً در مطالعات تجربی از داده‌های دبی استفاده می‌شود و آن‌ها با به‌کارگیری معادله مانینگ (رابطه ۶) و معلوم بودن ویژگی‌های هیدرولیکی جریان (شعاع هیدرولیک (R)، ضریب زبری مانینگ (n) و شیب سطح آب (S)) به سرعت جریان (V) تبدیل می‌شوند. به‌عنوان‌مثال ابراهیم و همکاران (Ibrahim *et al.*, 2021) به بررسی پتانسیل انرژی آبی‌جنبشی در حوضه رودخانه پاهانگ مالزی با استفاده از داده‌های مشاهداتی دبی در ۱۰ سایت پرداختند. در این پژوهش برای تحلیل انرژی، منحنی تداوم جریان[3] در سایت‌های دارای پتانسیل رسم شد و با استفاده از معادله مانینگ دبی به سرعت جریان تبدیل گشت. در پژوهشی دیگر جان و وارگس (John & Varghese, 2021a, 2021b) برای طراحی

1- Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)
2- Velocity Duration Curve (VDC)
3- Flow Duration Curve (FDC)

یک سامانه هیبریدی فوتوولتائیک-آبی‌جنبشی از داده‌های دبی یک کانال ذوزنقه‌ای آبیاری استفاده کردند و با استفاده از معادله مانینگ (رابطه ۶) سرعت جریان را محاسبه نمودند.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

چالش اساسی در استفاده از معادله مانینگ در رودخانه‌ها تعیین پارامترهای هندسی (عرض و عمق) جریان برای محاسبه شعاع هیدرولیک است، زیرا در بسیاری از مقاطع رودخانه‌ها این پارامترها ثبت نمی‌شود. شعاع هیدرولیک یک مقطع رودخانه معمولاً با گذر زمان به‌خاطر دینامیک بودن سطح تراز رودخانه تغییر می‌کند. با فرض مستطیلی بودن بستر رودخانه، می‌توان شعاع هیدرولیک (رابطه ۷) که برابر نسبت مساحت (A) به محیط خیس‌شده (P) است را به‌صورت تابعی از عمق (d) و عرض (w) رودخانه نوشت (Khaliq & Cousineau, 2020; Kirby *et al.*, 2022; Schulze, Hunger, & Döll, 2005).

$$R = \frac{A}{P} = \frac{d.w}{2d + w} \quad (۷)$$

در همین راستا شولتز و همکاران (Schulze *et al.*, 2005) که به دنبال رویکردی برای تعیین سرعت رودخانه‌ها بودند، استفاده توام از هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ را پیشنهاد داده و بیان کردند که روش مناسب ارزیابی سرعت رودخانه بایستی به‌قدری ساده باشد تا با استفاده از داده‌های در دسترس محاسبه شود و از طرفی آن‌قدر پیچیدگی داشته باشد که مقدار نسبتاً واقعی سرعت جریان در شرایط مختلف محیطی را در اختیار پژوهشگران قرار دهد.

رابطه بین مشخصه‌های رودخانه و دبی در طول زمان را هندسه هیدرولیک گویند که در یک سایت منجر به دو دسته هندسه هیدرولیک ایستگاهی[1] و هندسه هیدرولیک پایین‌دست[2] می‌شود (Singh, 2022). در روش ایستگاهی نیاز به اندازه‌گیری‌های میدانی تکراری در یک سطح مقطع خاص است، اما در روش پایین‌دست نیاز به اندازه‌گیری میدانی با یک دوره زمانی خاص بین سطح مقطع‌های مختلف یک رودخانه یا دیگر رودخانه‌ها است (Ridgill, Lewis, Robins, Patil, & Neill, 2022). مفهوم هندسه هیدرولیک در ابتدا توسط لئوپلد و مادوک (Leopold & Maddock Jr, 1953) مطرح و روابط آن به شکل توابع توانی (روابط ۸ و ۹) ارائه شد. که در آن w عرض جریان، d عمق جریان، Q دبی جریان، b و f توان‌ها و a و c ثابت‌های تناسب هستند. در روابط هندسه هیدرولیک، دبی تنها متغیر مستقل کلیدی برای کنترل سایر متغیرها است و تغییرات آن منجر به تغییر در مشخصه‌های رودخانه، یعنی عرض و عمق جریان، می‌شود (Singh, 2022).

$$w = a.Q^b \quad (۸)$$

$$d = c.Q^f \quad (۹)$$

هدف این پژوهش ارائه و پیاده‌سازی یک روش سریع برای تخمین سرعت در رودخانه‌ها و ارزیابی توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری موجود در آن‌ها بر پایه استفاده از هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ است. داده‌های دبی ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری، ورودی کلیدی این روش سنجش است که با تلفیق آن با داده‌های شیب محلی و ضریب زبری مانینگ می‌توان به تخمینی از توان و انرژی نظری موجود در هر بازه‌ای از رودخانه دست‌یافت.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه و کلیات روش پتانسیل‌سنجی

در این پژوهش برای بررسی توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری رودخانه‌ها دو ایستگاه هیدرومتری گچسر و سیرا-کرج (جدول ۱) در حوضه آبخیز سد کرج انتخاب شدند. این حوضه قسمتی از دامنه جنوبی ارتفاعات البرز در شمال شرق استان البرز است و در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبخیز کشور جزو دریاچه نمک است که مساحت آن ۷۱۶ کیلومترمربع در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا-کرج است.

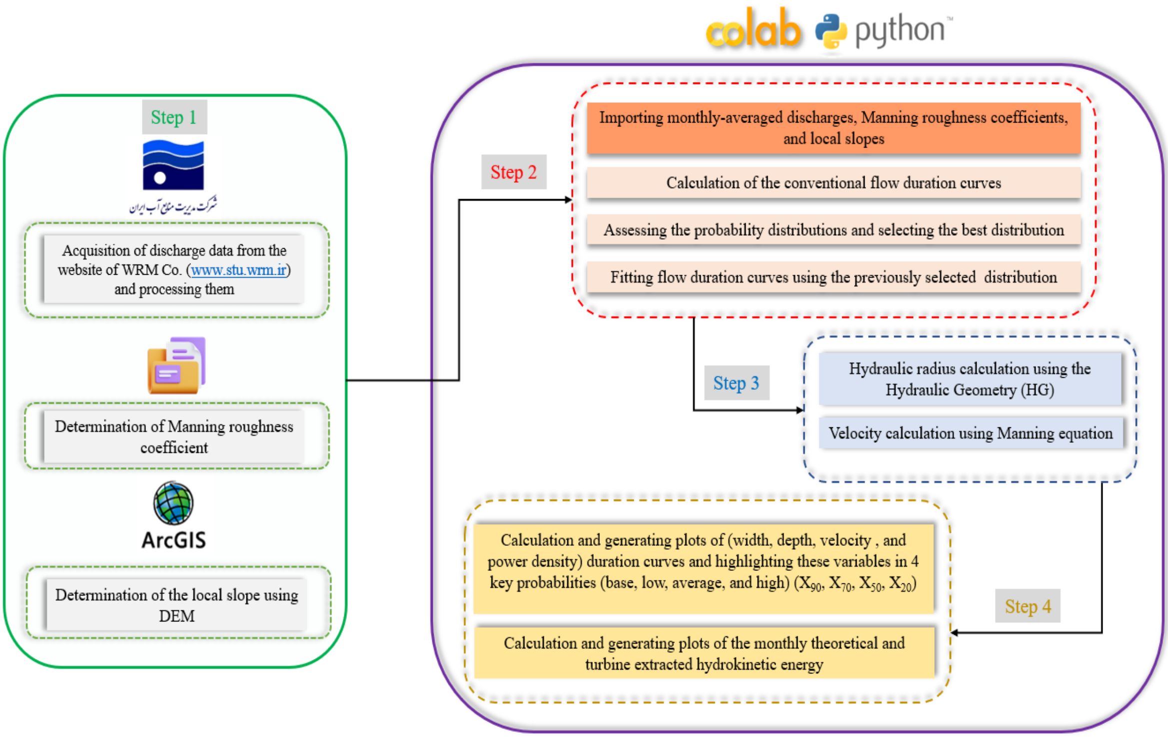
برای پیاده‌سازی این روش یک کد به زبان پایتون در محیط گوگل کولب[3] توسعه یافت. در این کد ابتدا دبی‌های میانگین ماهانه[4] مربوط به یک دوره آماری ۱۰ ساله، ضریب زبری و شیب محلی برای هر ایستگاه دریافت شده و سپس منحنی تداوم جریان با بهترین تابع توزیع احتمال برآورد می‌شود، در محله بعد با بهره‌گیری از روابط هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ، به محاسبه عرض، عمق، شعاع هیدرولیک و سرعت جریان پرداخته می‌شود تا نهایتاً پارامترهای چگالی توان و انرژی ماهانه هر ایستگاه حاصل شود. در شکل ۲ روندنمای روش توسعه‌یافته برای ارزیابی میزان توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری در این پژوهش در ۴ مرحله آمده است و در ادامه هر مرحله به‌تفصیل شرح داده شده است.

1- At-a-station Hydraulic Geometry (AHG)
2- Downstream Hydraulic Geometry (DHG)
3- Google COLAB
4- Monthly-Averaged Discharges

جدول ۱– مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه (Hydrometry Stations Data, 2023)

Table 1- Details of the assessed hydrometry stations

طول دوره آماری Statistical Period	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع Elevation (m)	کد Code	رودخانه River	ایستگاه Station
1387-1397 2008-2018	36-07-00	51-20-00	2220	41-253	گاجره Gajereh	گچسر Gachsar
1387-1397 2008-2018	36-02-00	51-09-00	1790	41-110	کرج Karaj	سیرا-کرج Siera-Karaj



شکل ۲– روندنمای روش توسعه‌یافته برای ارزیابی توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری

Fig.2. Flowchart of the developed method for theoretical hydrokinetic power and energy assessment

مراحل ارزیابی توان و انرژی

مرحله ۱– آماده‌سازی داده‌ها

در این بخش ابتدا داده‌های دبی روزانه استان البرز از پورتال ارائه آمار پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران به آدرس www.stu.wrm.ir دانلود شده و پس‌ازآن داده‌های دوره آماری مدنظر تفکیک و میانگین ماهانه آن‌ها محاسبه می‌شود.

ضریب زبری به درجه مقاومت در مقابل جریان گفته می‌شود و یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم برای طراحی و محاسبات هیدرولیکی رودخانه‌ها است. عوامل زیادی بر ضریب زبری آبراهه اصلی تأثیر دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از قطر دانه‌های رسوب در بستر، عمق جریان، لزجت جریان، شکل بستر، پوشش گیاهی بستر و غلظت رسوب جریان. در این پژوهش مقدار میانگین پیشنهادشده توسط آرمان (Arman, 2006) که برابر ۰/۰۴۵ است برای مدل‌سازی سرعت جریان در رودخانه کرج انتخاب شد. هرچند در صورت عدم اطلاع دقیق از ضریب زبری می‌توان مقدار ۰/۰۴ را به‌صورت جهانی برای اکثر رودخانه‌ها فرض کرد (Fiedler & Döll, 2010).

در گام بعد مقادیر شیب محلی ایستگاه‌های هیدرومتری (یا به‌طورکلی هر بازه رودخانه[1] موردمطالعه) با استفاده از تحلیل نقشه رقومی ارتفاع محدوده موردمطالعه استخراج می‌شود (جدول ۳). برای انجام این کار بایستی ابتدا شبکه آبراهه‌های منطقه موردمطالعه استخراج شود تا با در نظر گرفتن مختصات ایستگاه هیدرومتری با

1- River reach

استفاده از ابزار 3D Analyst پروفیل طولی ارتفاع در بالا و پایین‌دست ایستگاه در راستای رودخانه استخراج شود. در انتها با محاسبه اختلاف ارتفاع (Δh) و فاصله طولی (L) می‌توان شیب ایستگاه ($S = \frac{\Delta h}{L}$) را محاسبه نمود.

جدول ۳- مراحل استخراج شیب محلی ایستگاه‌های هیدرومتری در نرم‌افزار ArcGIS

Table 3- Steps for extracting local slope of hydrometry stations using ArcGIS software

گام **Step**	جعبه‌ابزار **Toolbox**	عملیات **Operation**
استخراج شبکه آبراهه‌ها Extraction of the stream network	Hydrology	فراخوانی نقشه DEM محدوده موردمطالعه Importing the DEM map of the studied area اجرای دستور *Fill* به‌منظور تصحیح پستی‌وبلندی‌های نامتعارف مدل رقومی Executing the *Fill command* in order to correct the unusual heights of the digital model اجرای دستور *Flow Direction* به‌منظور تعیین جهت جریان Executing the *Flow Direction command* in order to determine the flow direction اجرای دستور *Flow Accumulation* به‌منظور محاسبه تجمع جریان Executing the *Flow Accumulation command* in order to calculate the accumulated flow اجرای دستور *Map Algebra* و تعیین یک حد آستانه برای استخراج شبکه آبراهه‌ها Executing the *Map Algebra command* and determining a threshold limit to extract the stream network
استخراج پروفیل طولی ارتفاع Extraction of the longitudinal elevation profile	3D Analyst	استفاده از *3D Analyst* برای استخراج پروفیل طولی ارتفاع در بالا و پایین‌دست ایستگاه‌ها Using the *3D Analyst* to extract the longitudinal profile of height upstream and downstream of the stations

مرحله ۲- پردازش داده‌های دبی

در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، ابزارهای محاسباتی زیادی در اختیار محققان و مهندسان قرار دارد که در میان آن‌ها، منحنی تداوم جریان[1] برای توصیف رژیم هیدرولوژیک حوضه آبخیز استفاده می‌شود (Burgan & Aksoy, 2020). منحنی تداوم جریان یک تصویر گرافیکی از توزیع تجمعی[2] جریان‌ها در یک حوضه آبخیز است. با داشتن داده‌های ثبت‌شده جریان برای یک بازه زمانی خاص، منحنی تداوم جریان را می‌توان با رتبه‌بندی[3] جریان‌ها و تخمین احتمال فراگذشت[4] رسم کرد. منحنی حاصل، که رابطه‌ای بین احتمالات فراگذشت (یا تداوم زمانی جریان) و دبی است، نشان‌دهنده‌ی درصد زمانی است که یک مقدار جریان معین در یک دوره تاریخی برابر آن بوده یا فراتر از آن رفته است (Eshra, Zobaa, & Abdel Aleem, 2021; Vogel & Fennessey, 1995). منحنی‌های تداوم جریان هرسال را به‌صورت جداگانه (یک منحنی تداوم جریان برای هر یک سال داده) یا کل دوره ثبت‌شده (یک منحنی تداوم جریان برای کل دوره) در نظر می‌گیرند. اولی برای ارزیابی تغییرات سال‌به‌سال جریان مفید است، درحالی‌که دومی را می‌توان به‌عنوان یک برآورد پایا از کل رژیم هیدرولوژیک در طول دوره موردبررسی در نظر گرفت که برای توسعه و مدیریت منابع آب ضروری هستند و به‌طورمعمول در طراحی نیروگاه‌های برق‌آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Luan, Liu, Lin, & Huang, 2021; Pugliese, Farmer, Castellarin, Archfield, & Vogel, 2016).

در پردازش داده‌های دبی، ابتدا منحنی تداوم جریان در سه گام اصلی (Eshra *et al.*, 2021) محاسبه و رسم می‌شود: (۱) محاسبه و تهیه لیست دبی‌های میانگین ماهانه برای یک دوره معین که دارای n مقدار است (مثلاً برای دبی‌های ماهانه در ۱۰ سال عدد n برابر ۱۲۰ است)، (۲) مرتب کردن مقادیر دبی طوری که بیشترین مقدار در ابتدای لیست و کمترین در انتهای لیست قرار گیرد و به هر دبی یک عدد R نسبت داده شود. عدد R نشان‌دهنده‌ی موقعیت رتبه‌بندی‌شده دبی است، به‌گونه‌ای که بیشترین دبی عدد ۱ و کمترین دبی عدد ۱۲۰ را به خود اختصاص می‌دهد، (۳) محاسبه احتمال فراگذشت (EP) برای هر دبی بر اساس رابطه (۱۰) و رسم نمودار منحنی تداوم

1- Flow Duration Curve (FDC)
2- Cumulative Distribution
3- Ranking
4- Exceedance Probability

جریان (احتمال فراگذشت-دبی).

$$EP = \frac{R}{n+1} \quad (۱۰)$$

پس‌ازاین بخش، منحنی تداوم جریان مرسوم با استفاده از توابع توزیع احتمال (جدول ۴) مدل‌سازی می‌شود. سپس توزیع‌های احتمال برازش‌شده به کمک شاخص‌های نکوئی (جدول ۵) مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین توزیع انتخاب می‌شود تا یک برآورد کلی دقیق از شرایط هیدرولوژیک منطقه حاصل شود.

جدول ٤- توابع توزیع احتمال (Langat, Kumar, & Koech, 2019; Luan *et al.*, 2021)

Table 4- Probability distribution functions

توزیع **Distribution**	تابع **Function**	محدوده پارامترها **Range of Parameters**
نرمال Normal	$f(x) = \frac{\exp(-\frac{x^2}{2})}{\sqrt{2\pi}}$	$x \in \mathbb{R}$
گاما* Gamma	$f(x,a) = \frac{x^{a-1}e^{-x}}{\Gamma(a)}$	$x \geq 0, a > 0$
وایبول Weibull	$f(x,c) = cx^{c-1}\exp(-x^c)$	$x > 0, c > 0$
گامبل Gumbel	$f(x) = \exp(-(x + e^{-x}))$	$x > 0$
لوگ-نرمال** Log-normal	$f(x,s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{\log^2(x)}{2s^2})$	$x > 0, s > 0$

* $\Gamma(a)$: تابع گاما

Gamma Function

** s: انحراف از معیار استاندارد

Standard Deviation

جدول ۵- شاخص‌های نکوئی برازش (Babaei, Jalili, Aminzadeh, Soleimani, & Hazbavi, 2022; Luan *et al.*, 2021)

Table 5-Goodness-of-fit indices

شاخص **Index**	رابطه **Equation**	دامنه تغییرات **Variability Range**
ضریب تعیین Coefficient of Determination	$R^2 = \frac{\sum[(P_o - \bar{P}_o)(P_m - \bar{P}_m)]^2}{\sum(P_o - \bar{P}_o)^2 \sum(P_m - \bar{P}_m)^2}$	$0 \leq R^2 \leq 1$
ریشه مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	$RSME = \sqrt{\frac{\sum(P_o - P_m)^2}{N}}$	$0 \leq RSME \leq \infty$
میانگین قدر مطلق خطا Mean Absolute Error (MAE)	$MAE = \frac{\sum\lvert P_o - P_m\rvert}{N}$	$0 \leq MAE \leq \infty$
خطای میانگین Mean Error (ME)	$ME = \frac{1}{n}\sum(P_o - P_m)$	$-\infty \leq ME \leq \infty$

مرحله ۳- محاسبات هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ

در پژوهش‌های (Bomhof, 2014)، (Punys *et al.*, 2015) و (Tigabu, Wood, & Admasu, 2020)، با موجود بودن داده‌های هندسی (عرض و تراز آب) و دبی، ضرایب و توان‌های روابط (۱۱) و (۱۲) با استفاده از رگرسیون برای هر رودخانه موردمطالعه محاسبه شد، اما در این پژوهش به دلیل فقدان و همچنین عدم دسترسی راحت به چنین داده‌هایی در مقاطع دارای آمار در سطح کشور از مقادیر توصیه‌شده توسط آلن و همکاران (Allen, Arnold, & Byars, 1994) استفاده شد. این پژوهشگران با انجام تحلیل رگرسیونی روی ۶۷۴ مقطع رودخانه در آمریکا و کانادا بهترین ضرایب (a و c) و نماهای (b و f) در معادلات را برای دبی مقطع‌پر[۱] (Q_b) استخراج نمودند. این مقادیر دارای ضریب تعیین ۰/۸۸ و ۰/۷۵ برای عرض و عمق هستند. استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) در بسیاری از پژوهش‌های هیدرولیک و مهندسی رودخانه در مناطق مختلف دنیا در

1- Bank-Full Discharge

سطح برنامه‌ریزی و پیش‌شناسایی رایج و معتبر است. خلاصه‌ای از این پژوهش‌ها در جدول ۶ آمده است.

$$W = 2.71Q_b^{0.557} \quad (۱۱)$$

$$D = 0.349Q_b^{0.341} \quad (۱۲)$$

جدول ٦- خلاصه پژوهش‌هایی که در آن برای تعیین ابعاد هندسی رودخانه‌ها از روابط (Allen *et al.*, 1994) استفاده شده است.

Table 6- Summary of the articles in which the hydraulic geometry proposed by (Allen *et al.*, 1994) was utilized

منطقه جغرافیایی **Geographical zone**	پارامتر(های) هندسی **Geometrical parameters**	هدف پژوهش **Research objective**	منبع **Reference**
حوضه آبخیز رودخانه موزل Moselle River basin	عرض و عمق Width and depth	توسعه یک مدل پیش‌بینی سیلاب Development of a flood forecasting model	Gerlinger & Demuth, 2000
جهانی Global	عرض، عمق Width and depth	تغییرات ماهانه و روزانه جریان‌ها و ذخیره آب قاره‌ای Monthly and daily variations of continental water storage and flows	Fiedler & Döll, 2010
استرالیا، تاسمانی Australia, Tasmania	عمق Depth	تخمین نرخ بار ورودی مواد مغذی (فسفر کل و نیتروژن کل) به رودخانه‌ها Estimating nutrient generation rates (total P and total N) into rivers	Broad & Corkrey, 2011
قاره اروپا Europe	عرض و عمق Width and depth	مدل‌سازی سرعت جریان متغیر رودخانه در مقیاس قاره‌ای Modeling variable river flow velocity on a continental scale	Verzano *et al.*, 2012
اعمال‌شده روی یک منحنی تداوم جریان فرضی Implemented on a model FDC	عرض و عمق Width and depth	بررسی قابلیت اطمینان پره‌های توربین‌های آبی‌جنبشی Reliability analysis for hydrokinetic turbine blades	Hu & Du, 2012
هیمالیای غربی، رودخانه سوتلج Western Himalaya, Sutlej River	عرض و عمق Width and depth	بررسی سهم باران، برف و یخچال‌ها در دبی رودخانه Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge	Wulf, , Bookhagen, & Scherler, 2016
چین ، رودخانه یانگ‌تسه China, Yangtze River	عمق Depth	مدل‌سازی غلظت و توزیع هیدروکربن آروماتیک چند حلقه‌ای Modeling of the Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration and distribution	Zhu *et al.*, 2019
جهانی Global	عرض Width	توسعه کتابخانه هیدرواستریمر (نسخه ۱) در نرم‌افزار R جهت بررسی جریان در شبکه رودخانه‌ها Development of an R package, a software library Hydrostreamer V1.0, aiming to estimate streamflow in river networks	Kallio, Guillaume, Virkki, Kummu, & Virrantaus, 2021
پاکستان، رودخانه پونچ Pakistan, Poonch River	عرض و عمق Width and depth	طراحی و بهینه‌سازی یک سامانه هیبریدی انرژی دارای توربین آبی‌جنبشی Design and optimization of a hybrid on-site energy generation system including hydeokinetic turbines	Tahir *et al.*, 2021

شایان‌ذکر است که مطالعات زیادی بر جنبه‌های مختلف رودخانه کرج ازجمله بررسی جریان‌های سیلابی (Karam, Safari, & Hajehforosh Nia, 2015; Khatooni, Hooshyaripor, MalekMohammadi, & Noori, 2023)، بررسی رسوب معلق (Arabkhedri, Sedarati, & Esmali, 2017; Keihani, Akhoondali, & Fathian, 2021) و بررسی تغییرات هیدروموروفولوژیک (Ghaforpur-Anbaran, Ahmadabadi, Ghanavati, & Yasi, 2023; Samadi & Azizian, 2021) انجام شده است، اما تنها در موارد معدودی به بررسی هندسه طبیعی رودخانه و تخمین آن از طریق پارامترهای هیدرولیک پرداخته‌شده است (Khosravi, Sheikh Khozani, & Cooper, 2021; Tahershamsi & Imanshoar, 2010). در این پژوهش‌ها که تمرکز بر تعیین دقیق هندسه رودخانه با در نظر گرفتن چرخه رسوب‌گذاری و فرسایش در آبراهه‌های رسوبی بود، پژوهشگران با ارائه روابطی بر اساس داده‌های صحرایی که اثر پارامترهای قطر مؤثر و غلظت وزنی ذرات رسوب (Tahershamsi & Imanshoar, 2010) و همچنین تنش شیلدز (Khosravi *et al.*, 2021) را در نظر می‌گرفت به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روابط که مختص رودخانه کرج است از دقت بالاتری به نسبت سایر روابط تجربی همراه

است، اما در این پژوهش چون هدف ارائه روشی صرفاً برای تخمین هندسه رودخانه در مقیاس کشور است (مشابه پژوهش‌های جدول ۶) استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) توصیه و به‌کارگرفته می‌شود.

در این روش فرض می‌شود که شعاع هیدرولیک غیر مقطع‌پر از همان قواعد هندسی پیروی می‌کند که دبی مقطع پر نیز پیروی می‌کند. بر این اساس از روابط (۱۱) و (۱۲) برای محاسبه شعاع هیدرولیک طبق رابطه (۱۰) استفاده می‌شود. با فرض این‌که اکثر رودخانه‌ها تقریباً یک بستر صاف دارند و عرض آن‌ها بیشتر از عمق است، فرض مقطع مستطیلی برای دبی مقطع پر قابل‌قبول است. برای دبی کمتر از مقطع‌پر عرض و عمق کوچک می‌شوند اما نسبت آن‌ها تقریباً ثابت می‌ماند (Khaliq & Cousineau, 2020; Schulze *et al.*, 2005)

مرحله ۴- تولید خروجی‌ها

در مرحله آخر ۲ دسته خروجی به‌صورت (۱) منحنی‌های تداوم (عرض، عمق، سرعت و چگالی توان) و (۲) نمودارهای انرژی ماهانه (نظری و استحصالی توربین) ایجاد خواهد شد. در بررسی منحنی‌های تداوم جریان ۴ نقطه احتمالی ۹۰٪، ۷۰٪، ۵۰٪ و ۲۰٪ دارای اهمیت است که در تعیین اندازه و تعداد توربین‌ها کاربرد دارند. دو نقطه ۷۰٪ و ۲۰٪ برای تقسیم‌بندی منحنی تداوم جریان به سه ناحیه جریان زیاد[1] (۲۰٪-۰٪)، جریان میانی[2] (۷۰٪-۲۰٪) و جریان کم[3] (۱۰۰٪-۷۰٪) است و نقاط ۹۰٪ و ۵۰٪ مشخص‌کننده جریان متوسط و پایه هستند (Chilkoti, Bolisetti, & Balachandar, 2019; Sojka, 2022). از سوی دیگر، خروجی دوم میزان انرژی نظری ماهانه موجود در هر ایستگاه و همچنین میزان انرژی تولیدی ماهانه توسط یک نوع توربین با سطح مقطع واحد (یک مترمربع) را نمایش می‌دهد.

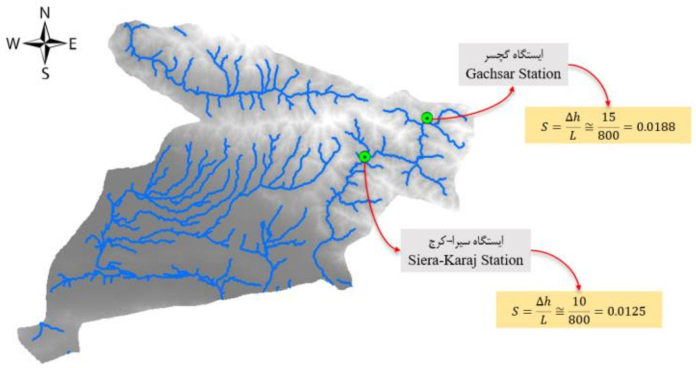
نتایج و بحث

نتایج شیب محلی

در این بخش که هدف ارائه یک روش سنجش‌ازدور برای محاسبه شیب محلی برای هر بازه موردنظر از رودخانه برای محاسبه توان آبی‌جنبشی بود، در ابتدا شبکه آبراهه‌های استان البرز محاسبه (خطوط آبی در شکل ۳) و سپس ارتفاع دو نقطه (یکی در ۴۰۰ متر بالادست و دیگری ۴۰۰ متر پایین‌دست هر ایستگاه هیدرومتری) استخراج و مقادیر شیب ۰/۰۱۸۸ و ۰/۰۱۲۵ به‌ترتیب برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا-کرج محاسبه شد (شکل ۳). قابل‌ذکر

1- High-Flow
2- Mid-Flow
3- Low-Flow

است که هرچه وضوح (رزولوشن) نقشه رقومی ارتفاع بیشتر باشد (مثلاً نقشه‌های تولیدشده توسط لایدار) مقادیر شیب با دقت بالاتری محاسبه می‌شوند، اما دسترسی به چنین داده‌هایی برای هر منطقه به‌سادگی میسر نیست.



شکل ۳- نتایج تحلیل مدل رقومی ارتفاع استان البرز و استخراج شیب محلی برای ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر و سیرا

Fig.3. DEM analysis results of the Alborz province and the extraction of local slope for Gachsar and Siera hydrometry stations

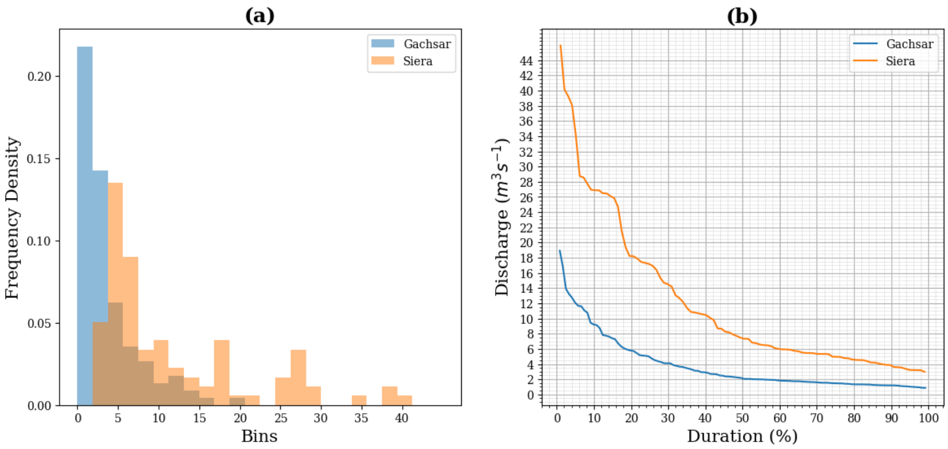
نتایج پردازش دبی‌ها

دبی‌های میانگین ماهانه در سال‌های آبی ۸۸-۸۷ تا ۹۷-۹۶ برای ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر و سیرا-کرج فراخوانی و هیستوگرام و منحنی تداوم جریان به روش مرسوم برای این دو ایستگاه محاسبه و رسم شد (شکل ۴). همان‌طور که از هیستوگرام داده‌ها (شکل ۴ (a)) مشخص است تجمع داده‌های دبی ایستگاه گچسر و سیرا به‌ترتیب تقریباً در محدوده ۲/۵-۱ مترمکعب بر ثانیه و ۱۰-۲/۵ مترمکعب بر ثانیه است، این اعداد دقیقاً متناظر همان قسمت از منحنی تداوم جریان هستند که شیب کمتری داشته و در دامنه احتمالی ۴۰٪ الی ۱۰۰٪ واقع شده است (شکل ۴ (b)).

به‌منظور برازش منحنی تداوم جریان ۵ تابع توزیع احتمال نرمال، گاما، گامبل، وایبول و لوگ-نرمال روی داده‌های دبی هر ایستگاه اعمال شد (شکل ۵) و با ۵ معیار نکویی برازش (ضریب تعیین، ریشه مربعات خطا، میانگین قدرمطلق خطا و خطای میانگین) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس جدول ۷، توزیع لوگ نرمال بهترین مدل برازش‌شده روی داده‌های دبی هر دو ایستگاه با ضریب تعیین ۰/۹۹ بوده است. استفاده از توزیع لوگ نرمال برای داده‌های رودخانه‌ای که عموماً چولگی راست (مثبت)[4] دارند در پژوهش‌های (Punys *et al.*, 2015)، (Langat *et al.*, 2019) و (Luan *et al.*, 2021) تایید

4- Right (Positive) Skewness

شده است و یافته پژوهش حاضر با آن‌ها مطابقت دارد.



شکل ٤– تحلیل داده‌های کل دوره آماری برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا: (a) هیستوگرام، (b) منحنی تداوم جریان

Fig.4. Analysis of All-Time-of-Record data for Gachsar and Siera-Karaj stations: (a) Discharge histogram, (b) Flow Duration Curve (FDC)

منحنی‌های تداوم جریان در شکل ۵ (c) و (f) نشان می‌دهند که ایستگاه گچسر و سیرا دبی میانگین (Q_{50}) معادل ۲/۳۴ و ۷/۶۸ مترمکعب بر ثانیه را دارند. میزان جریان کم (Q_{90}) برای آن‌ها به‌ترتیب برابر ۱/۱۴ و ۳/۹۲ مترمکعب بر ثانیه است که بسیار در طراحی و تعیین اندازه مبدل‌های انرژی اثرگذار است. نتایج تحقیقات (Karimi *et al.*, 2021) نشان می‌دهد که دبی ایستگاه گچسر معمولاً از ۰/۸۷ تا ۴/۱۵ مترمکعب بر ثانیه و دبی ایستگاه سیرا بین ۳/۱۸ تا ۱۷/۵ مترمکعب در ثانیه متغیر است که تقریباً مشابه مقادیر برآوردشده در این پژوهش است.

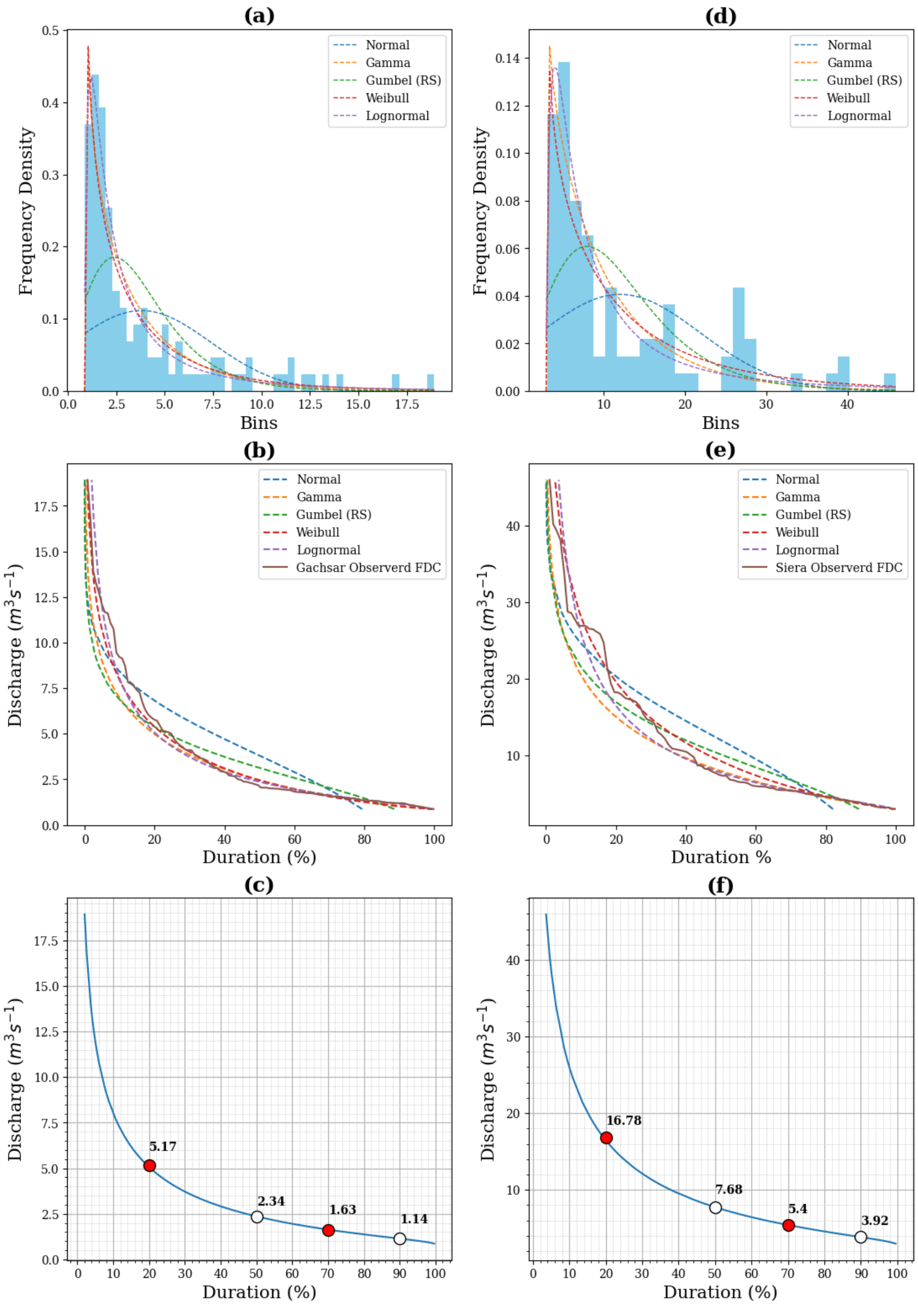
نتایج محاسبات هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ در شکل ۶ برای ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر و سیرا نشان داده شده است. شکل ۶ (a) نشان می‌دهد که عرض تخمینی جریان در ۹۰٪ اوقات و بیشتر (w_{90}) در سیرا برابر ۵/۸ متر است که این مقدار تقریباً ۲ برابر عرض ایستگاه گچسر (۲/۹۱ متر) در احتمال متناظر است. نسبت تقریبی ۲ بین عرض جریان در ایستگاه سیرا و گچسر در سایر احتمال‌های ۷۰٪، ۵۰٪ و ۲۰٪ نیز حفظ می‌شود. عمق تقریبی ۰/۵۶ متر در ۹۰٪ اوقات و بیشتر (d_{90}) برای ایستگاه سیرا در شکل ۶ (b) مشخص شده که تقریباً ۱/۵ برابر عمق تخمینی ایستگاه گچسر (۰/۳۶ متر) در احتمال متناظر است. مشابه عرض، نسبت عمق بین ایستگاه سیرا و گچسر در سایر احتمال‌ها نیز به مقدار ۱/۵ ثابت است. بر این اساس همواره نسبت تقریبی مساحت جریان سیرا به گچسر تقریباً برابر ۲/۹ است، لذا با افزایش دبی در ایستگاه سیرا (پایین‌دست رودخانه کرج) سرعت افزایش چشمگیری نداشته و سرعت در ایستگاه سیرا به‌طور متوسط ۸٪ بیشتر از سرعت جریان در ایستگاه گچسر (بالادست رودخانه کرج) است. نسبت عرض به عمق ($\frac{w}{d}$) در ایستگاه گچسر بین ۸/۱ ($(\frac{w}{d})_{90}=\frac{2.91}{0.36}$) تا ۱۱ ($(\frac{w}{d})_{20}=\frac{6.77}{0.61}$) تغییر می‌کند، این در حالی است که این مقادیر برای ایستگاه سیرا برابر ۱۰/۵ در جریان کم و ۱۴/۳ در جریان زیاد می‌باشد.

طبق گزارش کرکه (Kirke, 2019) در رودخانه‌های متوسط و کوچک معمولاً در نقاطی که سرعت جریان بیش از ۱ متر بر ثانیه است عمق رودخانه کمتر از دو متر است. در اینجا طبق تخمین انجام‌شده ایستگاه سیرا ازنظر عمق وضعیت مناسب‌تری را نسبت به گچسر دارد، هرچند این مقادیر متوسط و تقریبی هستند و در مراحل بعد برای شناسایی دقیق‌تر نقاط مناسب نصب بایستی اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های هیدرولیک انجام شود تا بالاترین راندمان تبدیل انرژی حاصل شود.

بر اساس بررسی‌های محققان (Kirke, 2020; Tan, Kirke, & Anyi, 2021) توربین‌های جریان محوری (پروانه‌ای)، برای استحصال توان قابل‌توجه از رودخانه‌ها مناسب نیستند، مگر این‌که آب عمیق و با جریان سریع وجود داشته باشد، زیرا این توربین‌ها برای غوطه‌وری کامل[1] به عمقی بیشتر از قطر روتور (D) نیاز دارند و مساحت جاروب آن‌ها برابر است با $\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$. برای مثال یک توربین جریان محوری با قطر ۱ متر دارای مساحت جاروب تقریبی ۰/۸ مترمربع است و برای عملکرد بهینه به عمق بیش از ۱ متر نیاز دارد، اگرچه در حالت غوطه‌وری جزئی[2] نیز کار خواهد کرد اما مساحت

1- Full immersion
2- Partial immersion

مؤثر آن برای دریافت انرژی جریان بسیار کم می‌شود و عملکرد ضعیفی خواهد داشت این در حالی است که عمق تخمینی جریان گچسر و سیرا در ۹۰٪ اوقات و بیشتر به‌ترتیب معادل ۰/۳۶ و ۰/۵۶ متر محاسبه شده‌اند.



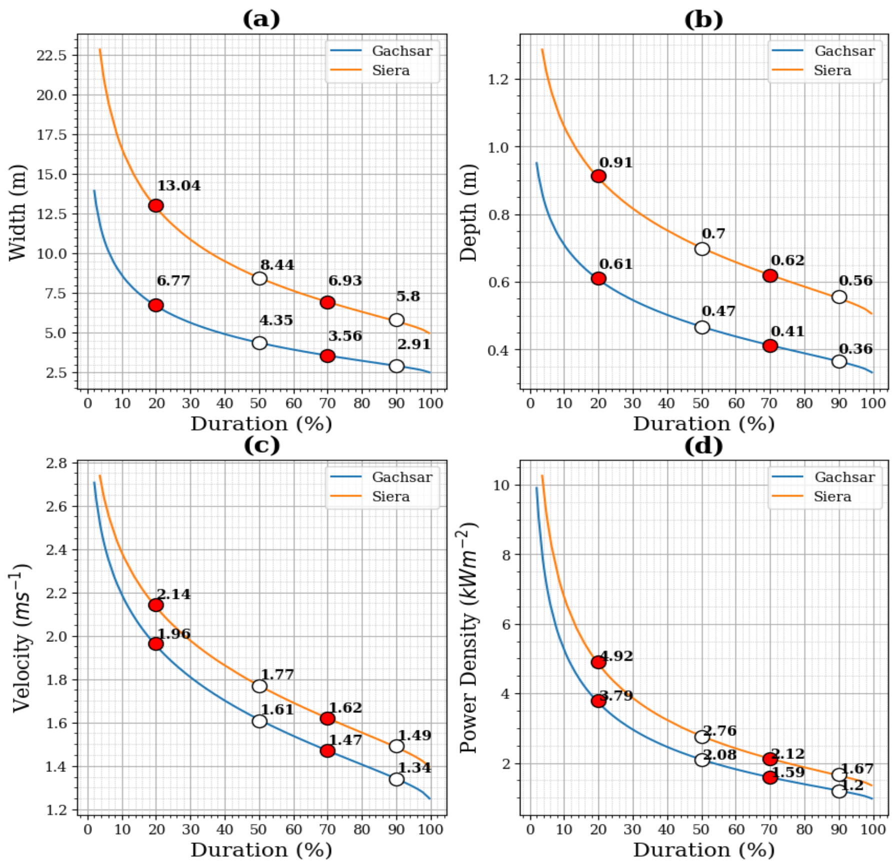
شکل ۵– نتایج برازش توابع توزیع احتمال: (a) هیستوگرام و توابع توزیع احتمال ایستگاه گچسر، (b) منحنی‌های تداوم جریان مشاهده‌ای و برازش‌شده ایستگاه گچسر، (c) منحنی تداوم جریان برازش‌شده با توزیع لوگ نرمال ایستگاه گچسر، (d) هیستوگرام و توابع توزیع احتمال ایستگاه سیرا، (e) منحنی‌های تداوم جریان مشاهده‌ای و برازش‌شده ایستگاه سیرا، (f) منحنی تداوم جریان برازش‌شده با توزیع لوگ نرمال ایستگاه سیرا

Fig.5. Results of PDF fitting: (a) Histogram and PDFs of Gachsar station, (b) Observed and fitted FDCs of Gachsar station, (c) Log-normal fitted FDC of Gachsar station, (d) Histogram and PDFs of Siera station, (e) Observed and fitted FDCs of Siera station, and (f) Log-normal fitted FDC of Siera station

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های نکوئی برای توابع برازش‌شده

Table 7- Values for goodness-of-fit (GOF) indices for the fitted functions

شاخص‌های نکوئی برازش GOF Indices	Station ایستگاه									
	Siera سیرا					Gachsar گچسر				
	توزیع Distribution									
	Normal	Gamma	Gumbel	Weibull	Log-normal	Normal	Gamma	Gumbel	Weibull	Log-normal
R^2	0.840	0.97	0.90	0.97	0.99	0.80	0.97	0.88	0.98	0.99
RMSE	0.111	0.048	0.089	0.050	0.030	0.127	0.040	0.097	0.037	0.026
MAE	0.095	0.039	0.075	0.037	0.024	0.108	0.035	0.081	0.030	0.022
ME	0.041	-0.019	0.029	0.031	-0.005	0.047	-0.009	0.039	-0.007	0.001



شکل ٦- نتایج محاسبات هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ: منحنی تداوم (a) عرض، (b) عمق، (c) سرعت، (d) چگالی توان

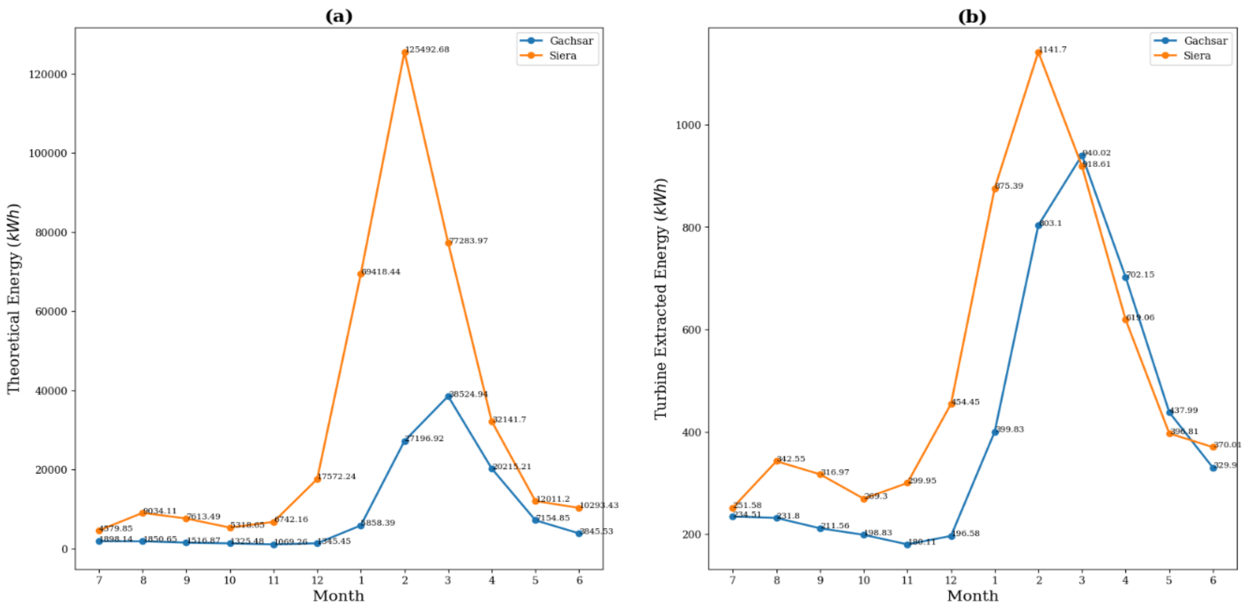
Fig.6. Results of the hydraulic geometry and Manning equation calculations: Duration curves of (a) width, (b) depth, (c) velocity, and (d) power density

به‌منظور به حداکثر رساندن مساحت جاروب در آب‌های کم‌عمق همانند ایستگاه‌های گچسر و سیرا (یا به‌طورکلی رودخانه کرج)، به یک توربین عریض و کم‌عمق یا به یک آرایه از چندین توربین کوچک در سراسر جریان نیاز است. کرکه (Kirke, 2020) استفاده از توربین‌های ساونیوس را برای آب‌های کم‌عمق و رودخانه‌های کوهستانی پیشنهاد کرده است که ضریب توان آن‌ها را می‌توان به‌طور متوسط ۰/۲ فرض کرد.

انرژی نظری (انرژی موجود در کل سطح مقطع یک رودخانه) برآورد شده برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا در شکل ۷ (a) آمده است. در ایستگاه گچسر در فصول کم‌آب سال انرژی نظری ماهانه ۳۸۵۰ کیلووات ساعت (شهریور) تا ۱۰۶۹ کیلووات ساعت (بهمن) موجود است، درحالی‌که در حالت بیشینه خود در خردادماه این عدد به حدود ۳۸۵۰۰ کیلووات ساعت در ماه می‌رسد. در ایستگاه سیرا نیز در فصول کم‌آب مقدار انرژی نظری ماهانه بین ۱۰۳۰۰ کیلووات ساعت

(شهریور) تا ۶۷۴۰ کیلووات ساعت (بهمن) متغیر است و در حالت بیشینه خود در اردیبهشت به مقدار تقریبی ۱۲۵۵۰۰ کیلووات ساعت در ماه می‌رسد. این در حالی است که با توجه به محدودیت‌های مساحت جریان و ضریب توان توربین‌های مختلف، مقادیر انرژی ماهانه قابل‌استحصال بسیار پایین‌تر از مقادیر نظری است.

شکل ۷ (b) میزان انرژی تولیدی ماهانه یک توربین ساونیوس با مساحت جاروب ۱مترمربع در ایستگاه‌های گچسر و سیرا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در حالت بیشینه انتظار می‌رود هر دستگاه توربین در ایستگاه گچسر و سیرا به‌ترتیب انرژی ماهانه معادل ۹۴۰ و ۱۱۴۲ کیلووات ساعت تولید کنند. باید خاطرنشان کرد که چون عرض جریان در ایستگاه سیرا بیشتر است می‌توان از تعداد توربین‌های متعدد در هر سطح مقطع عرضی استفاده نمود، اما در ایستگاه گچسر، به دلیل محدودیت عرض، استفاده از بیش از یک توربین در عرض امکان‌پذیر نیست.



شکل ۷– انرژی ماهانه ایستگاه‌های گچسر و سیرا: (a) انرژی نظری، (b) انرژی استحصالی هر دستگاه توربین

Fig.7. Monthly energy at Gachsar and Siera stations: (a) Theoretical energy and (b) Turbine extracted energy

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی سریع برای ارزیابی و تخمین توان و انرژی آبی‌جنبشی رودخانه‌های کشور بر اساس به‌کارگیری هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ معرفی و به‌کار گرفته شد. در این روش، از داده‌های دبی جریان ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری به‌عنوان ورودی کلیدی استفاده شد و منحنی تداوم جریان به روش مرسوم برای هر ایستگاه رسم شد. به‌منظور مدل‌سازی دقیق منحنی تداوم جریان توابع توزیع احتمال روی آن‌ها برازش شد و با ۵ معیار نکویی برازش مورد ارزیابی قرار گرفت. توزیع لوگ نرمال با ضریب تعیین ۰/۹۹ به‌عنوان بهترین توزیع انتخاب شد. در گام بعدی با استفاده از هندسه هیدرولیک عرض و عمق جریان و به‌تبع آن شعاع هیدرولیک محاسبه و سرعت از معادله مانینگ حاصل شد. از سرعت برای محاسبه چگالی توان استفاده شد و منحنی‌های تداوم چگالی توان برای دو ایستگاه گچسر و سیرا در حوضه آبخیز سد کرج ترسیم شد. نتایج نشان داد که چگالی توان برای ایستگاه گچسر و سیرا در ۹۰٪ اوقات و بیشتر به‌ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۶۷ کیلووات بر مترمربع است. بر اساس وضعیت عمق رودخانه استفاده از توربین‌های ساونیوس در رودخانه کرج پیشنهاد می‌شود. انتظار می‌رود که هر دستگاه توربین در ایستگاه‌های گچسر و سیرا بیشینه انرژی ماهانه به‌ترتیب برابر ۹۴۰ و ۱۱۴۲ کیلووات ساعت تولید کنند. با توجه به یافته‌های این پژوهش درباره شرایط هندسی جریان (عرض و عمق) و چگالی توان، محدوده ایستگاه سیرا محلی مناسب برای به‌کارگیری توربین‌های آبی جنبشی به‌منظور تولید بخشی از انرژی الکتریکی روستای سیرا است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت دانشگاه تهران در قالب رساله دکتری با پیشنهادنامه شماره ۷۹۴۸۹۵۳ قدردانی می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

مهران صادقی دلوئی: مفهوم‌سازی، جمع‌آوری و پردازش داده‌ها،

تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، اعتبارسنجی، تصویرسازی، استخراج و تهیه متن اولیه
متن اولیه
حسین موسی زاده: مشاوره فنی، استخراج و تهیه متن اولیه
رضا علیمردانی: مفهوم‌سازی، نظارت و مدیریت، استخراج و تهیـه

References

1. Adeogun, A. G., Ganiyu, H. O., Ladokun, L. L., & Ibitoye, B. A. (2020). Evaluation of hydrokinetic energy potentials of selected rivers in Kwara State, Nigeria. *Environmental Engineering Research*, *25*(3), 267-273. https://doi.org/10.4491/eer.2018.028
2. Ali, F., Srisuwan, C., Techato, K., Bennui, A., Suepa, T., & Niammuad, D. (2020). Theoretical hydrokinetic power potential assessment of the U-Tapao River Basin using GIS. *Energies*, *13*(7), 1749. https://doi.org/10.3390/en13071749
3. Allen, P. M., Arnold, J. C., & Byars, B. W. (1994). Downstream channel geometry for use in planning-level models 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *30*(4), 663-671. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03321.x
4. Arabkhedri, M., Sedarati, K., & Esmali, A. (2017). The trend of suspended sediment changes of Karaj and Jajroud rivers during recent decades. *Watershed Engineering and Management*, *9*(1), 22-33. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.108755
5. Arman, N. (2006). *Calibrating Manning's roughness coefficient in Karaj river reaches and analyzing it with HEC-RAS software* University of Tehran. https://noordoc.ir/thesis/19284
6. Babaei, L., Jalili, M. H., Aminzadeh, Z., Soleimani, F., & Hazbavi, Z. (2022). Modeling of monthly flow duration curve using nonlinear regression method for un-gauged watersheds of Ardabil Province. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, *9*(4), 1-18. http://jircsa.ir/article-1-439-fa.html
7. Bomhof, J. (2014). *Estimating flow, hydraulic geometry, and hydrokinetic power at ungauged locations in Canada* University of Ottawa. http://hdl.handle.net/10393/30383
8. Broad, S., & Corkrey, R. (2011). Estimating annual generation rates of total P and total N for different land uses in Tasmania, Australia. *Journal of Environmental Management*, *92*(6), 1609-1617. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.023
9. Burgan, H. I., & Aksoy, H. (2020). Monthly Flow Duration Curve Model for Ungauged River Basins. *Water*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/w12020338
10. Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R. (2019). Diagnostic evaluation of hydrologic models employing flow duration curve. *Journal of Hydrologic Engineering*, *24*(6), 05019009. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001778
11. Da Silva Holanda, P., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B., de Figueiredo, N. M., Macêdo, E. N., & Secretan, Y. (2017). Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants. *Renewable Energy*, *101*, 1203-1214. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.011
12. dos Santos, I. F. S., Camacho, R. G. R., Tiago Filho, G. L., Botan, A. C. B., & Vinent, B. A. (2019). Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data. *Renewable Energy*, *143*, 648-662. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.018
13. Eshra, N. M., Zobaa, A. F., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Assessment of mini and micro hydropower potential in Egypt: Multi-criteria analysis. *Energy Reports*, *7*, 81-94. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.165
14. Fiedler, K., & Döll, P. (2010). Monthly and daily variations of continental water storage and flows. *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*, 407-415. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10228-8_35
15. Gerlinger, K., & Demuth, N. (2000). Operational flood forecasting for the Moselle River Basin. Proceedings of the European Conference on Advances in Flood Research, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Germany.
16. Ghaforpur-Anbaran, P., Ahmadabadi, A., Ghanavati, E., & Yasi, M. (2023). Hydro-Morphological Analysis of Karaj River in the Urban Area from Beylqan to the Railway Bridge. *Geography and Environmental Sustainability*, *13*(1), 21-39. https://doi.org/10.22126/ges.2022.8026.2552
17. Henrique da Costa Oliveira, C., de Lourdes Cavalcanti Barros, M., Alves Castelo Branco, D., Soria, R., & Cesar Colonna Rosman, P. (2021). Evaluation of the hydraulic potential with hydrokinetic turbines for isolated systems in locations of the Amazon region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *45*, 101079. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101079
18. Hu, Z., & Du, X. (2012). Reliability analysis for hydrokinetic turbine blades. *Renewable Energy*, *48*, 251-262. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.05.002
19. Hydrometry Stations Data. (2023). Iranian Water Resources Management Company. Retrieved 5/10/2023 from www.stu.wrm.ir
20. Ibrahim, W., Mohamed, M., & Ismail, R. (2021). The potential of hydrokinetic energy harnessing in Pahang river

basin. *Proceedings of the 12th National Technical Seminar on Unmanned System Technology 2020: NUSYS'20*, 1163-1176. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2406-3_85

21. Ibrahim, W., Mohamed, M., Ismail, R., Leung, P., Xing, W., & Shah, A. (2021). Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*, *7*. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.003
22. Jenkinson, R. (2010). Assessment of Canada's hydrokinetic power potential.
23. John, B., & Varghese, J. (2021a). Optimum sizing of hydrokinetic turbine integrated photovoltaic-battery system incorporating uncertainties of resources. *International Journal of Green Energy*, *18*(6), 645-655. https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1875472
24. John, B., & Varghese, J. (2021b). Sizing and techno-economic analysis of hydrokinetic turbine based standalone hybrid energy systems. *Energy*, *221*, 119717. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119717
25. Kallio, M., Guillaume, J. H., Virkki, V., Kummu, M., & Virrantaus, K. (2021). Hydrostreamer v1. 0–improved streamflow predictions for local applications from an ensemble of downscaled global runoff products. *Geoscientific Model Development*, *14*(8), 5155-5181. https://doi.org/10.5194/gmd-14-5155-2021
26. Karam, A., Safari, A., & Hajehforosh Nia, S. (2015). Analysis of flood and fluvial processes in the occurrence of environmental hazards (Case Study: Arange Basin, Karaj River). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *2*(2), 53-68. https://doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.53
27. Karimi, S., Pourebrahim, S., Salajegheh, A., Malekian, A., Strauch, M., Volk, M., & Witing, F. (2021). Environmental flow requirements of Karaj River's sub-watersheds using Flow Duration Curve and Indicators of Hydrological Alteration. *Journal of Pasture and Watershed Management*, *74*(2), 393-405. https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.270394.1322
28. Keihani, A., Akhoondali, A., & Fathian, H. (2021). Multivariate Frequency Analysis of Peak Discharge and Suspended and Bed Sediment Load in Karaj Basin. *Iran Water Resources Management*, *17*(1), 47-67.
29. Khaliq, M., & Cousineau, J. (2020). *Assessment of Canada's Hydrokinetic Resources: A Review of Hydrologic Considerations*. National Research Council Canada= Conseil national de recherches Canada.
30. Khani, M. S., Shahsavani, Y., Mehraein, M., & Kisi, O. (2023). Performance evaluation of the savonius hydrokinetic turbine using soft computing techniques. *Renewable Energy*, *215*, 118906. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118906
31. Khatooni, K., Hooshyaripor, F., MalekMohammadi, B., & Noori, R. (2023). A combined qualitative–quantitative fuzzy method for urban flood resilience assessment in Karaj City, Iran. *Scientific Reports*, *13*(1), 241. https://doi.org/10.1038/s41598-023-27377-x
32. Khosravi, K., Sheikh Khozani, Z., & Cooper, J. R. (2021). Predicting stable gravel-bed river hydraulic geometry: A test of novel, advanced, hybrid data mining algorithms. *Environmental Modelling & Software*, *144*, 105165. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105165
33. Killingtveit, Å. (2019). 8- Hydropower. In T. M. Letcher (Ed.), *Managing Global Warming* (pp. 265-315). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00008-9
34. Killingtveit, Å. (2022). Hydropower Resources Assessment—Potential for Further Development. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00069-8
35. Kirby, K., Ferguson, S., Rennie, C., Nistor, I., & Cousineau, J. (2022). Assessments of available riverine hydrokinetic energy: a review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *49*(6), 839-854. https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0178
36. Kirke, B. (2019). Hydrokinetic and ultra-low head turbines in rivers: A reality check. *Energy for Sustainable Development*, *52*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.06.002
37. Kirke, B. (2020). Hydrokinetic turbines for moderate sized rivers. *Energy for Sustainable Development*, *58*, 182-195. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.003
38. Langat, P. K., Kumar, L., & Koech, R. (2019). Identification of the most suitable probability distribution models for maximum, minimum, and mean streamflow. *Water*, *11*(4), 734. https://doi.org/10.3390/w11040734
39. Lata-García, J., Jurado, F., Fernández-Ramírez, L. M., & Sánchez-Sainz, H. (2018). Optimal hydrokinetic turbine location and techno-economic analysis of a hybrid system based on photovoltaic/hydrokinetic/hydrogen/battery. *Energy*, *159*, 611-620. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.183
40. Leopold, L. B., & Maddock Jr, T. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications* [Report](252). (Professional Paper, Issue. U. S. G. P. Office. http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp252
41. Luan, J., Liu, D., Lin, M., & Huang, Q. (2021). The construction of the flow duration curve and the regionalization parameters analysis in the northwest of China. *Journal of Water and Climate Change*, *12*(6), 2639-2653. https://doi.org/10.2166/wcc.2021.324
42. Nhabetse, T., Cuamba, B., Kucel, S., & Mungoi, N. (2017). *Assessment of hydrokinetic potential in the Umbeluzi Basin, Mozambique*. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2017 with IEA SHC Solar Heating and Cooling Conference, Abu Dhabi, UAE.
43. Niebuhr, C. M., van Dijk, M., Neary, V. S., & Bhagwan, J. N. (2019). A review of hydrokinetic turbines and

enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.047
44. Pugliese, A., Farmer, W. H., Castellarin, A., Archfield, S. A., & Vogel, R. M. (2016). Regional flow duration curves: Geostatistical techniques versus multivariate regression. *Advances in Water Resources*, *96*, 11-22. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.06.008
45. Punys, P., Adamonyte, I., Kvaraciejus, A., Martinaitis, E., Vyciene, G., & Kasiulis, E. (2015). Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 643-652. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.155
46. Ridgill, M., Lewis, M. J., Robins, P. E., Patil, S. D., & Neill, S. P. (2022). Hydrokinetic energy conversion: A global riverine perspective. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *14*(4), 044501. https://doi.org/10.1063/5.0092215
47. Saini, G., Kumar, A., & Saini, R. P. (2021). Assessment of hydrokinetic energy– A case study of eastern Yamuna canal. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 5223-5227. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.595
48. Saini, G., & Saini, R. P. (2023). Hydrokinetic as an Emerging Technology. *Smart Energy and Advancement in Power Technologies*, 711-721. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4971-5_52
49. Samadi, A., & Azizian, A. (2021). Investigation of hydromorphological changes of Karaj River due to the implementation of water resources development and river engineering projects. *Journal of Hydraulics*, *16*(1), 93-110. https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.265438.1499
50. Saupi, A. F. M., Mailah, N. F., Radzi, M. A. M., Ahmad, S. Z., & Soh, A. C. (2018). Hydrokinetic Energy Assessment in Unregulated River for Hydrokinetic Performance Analysis Studies in East Malaysia. https://doi.org/10.20944/preprints201804.0357.v1
51. Schulze, K., Hunger, M., & Döll, P. (2005). Simulating river flow velocity on global scale. *Advances in Geosciences*, *5*, 133-136. https://doi.org/10.5194/adgeo-5-133-2005
52. Singh, V. (2022). *Handbook of Hydraulic Geometry*. Cambridge University Press.
53. Sojka, M. (2022). Directions and Extent of Flows Changes in Warta River Basin (Poland) in the Context of the Efficiency of Run-of-River Hydropower Plants and the Perspectives for Their Future Development. *Energies*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/en15020439
54. Tahershamsi, A., & Imanshoar, F. (2010). Determination of River Regime Equations Based on Stream Power Equation. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, *44*(1). https://jcse.ut.ac.ir/article_20753.html
55. Tahir, M. U. R., Amin, A., Baig, A. A., Manzoor, S., Haq, A., Asgha, M. A., & Khawaja, W. A. G. (2021). Design and optimization of grid Integrated hybrid on-site energy generation system for rural area in AJK-Pakistan using HOMER software. *AIMS Energy*, *9*(6), 1113-1135. https://doi.org/10.3934/energy.2021051
56. Tan, K. W., Kirke, B., & Anyi, M. (2021). Small-scale hydrokinetic turbines for remote community electrification. *Energy for Sustainable Development*, *63*, 41-50. https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.05.005
57. Tigabu, M. T., Wood, D. H., & Admasu, B. T. (2020). Resource assessment for hydro-kinetic turbines in Ethiopian rivers and irrigation canals. *Energy for Sustainable Development*, *58*, 209-224. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.005
58. Verzano, K., Bärlund, I., Flörke, M., Lehner, B., Kynast, E., Voß, F., & Alcamo, J. (2012). Modeling variable river flow velocity on continental scale: Current situation and climate change impacts in Europe. *Journal of Hydrology*, *424*, 238-251. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.005
59. Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1995). Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *31*(6), 1029-1039. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03419.x
60. Wulf, H., Bookhagen, B., & Scherler, D. (2016). Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge in the western Himalaya using remote-sensing data and distributed hydrological modeling. *Advances in Water Resources*, *88*, 152-169. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.004
61. Yadav, P. K., Kumar, A., & Jaiswal, S. (2023). A critical review of technologies for harnessing the power from flowing water using a hydrokinetic turbine to fulfill the energy need. *Energy Reports*, *9*, 2102-2117. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.033
62. Zhu, Y., Tao, S., Sun, J., Wang, X., Li, X., Tsang, D. C., Zhu, L., Shen, G., Huang, H., & Cai, C. (2019). Multimedia modeling of the PAH concentration and distribution in the Yangtze River Delta and human health risk assessment. *Science of the Total Environment*, *647*, 962-972. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.075